

止於至善

第四篇 同步电机之

第十三章

同步发电机在大电网上运行






東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

第十三章

同步发电机在大电网上运行

- 同步发电机的并联运行
- 隐极同步发电机的功角特性
- 凸极同步发电机的功角特性
- 同步发电机的有功功率调节
- 无功功率的调节和 V 形曲线
- 同步电动机与同步补偿机 (不讲)
- 同步发电机的进相运行 (不讲)






東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

1. 同步发电机的并联运行

什么是并联运行?
是指单台发电机和无穷大电网并联的运行模式。

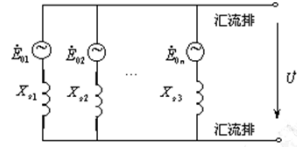


- 并联运行的优点
- 并联运行的条件
- 并联运行的方法

東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

I 并联运行的优点

- 单机供电的缺点: 不能保证供电质量(电压和频率的稳定性)和可靠性(发生故障就得停电), 无法实现供电的灵活性和经济性
- 解决方式: 通过并联可将几台发电机或几个电站并成一个电网

東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

I 并联运行的优点

- 提高用电质量
- 减少发电厂的储备容量
- 提高发电厂运行的经济性
- 提高电厂建设的效益
- 提高用电的可靠性

电网对单台发电机而言, $U=\text{const}$, $f=\text{const}$, 可以成为无穷大电网或无穷大汇流排。

并联运行就是单台发电机和无穷大电网的并联运行。



東南大學電氣工程學院

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

II 并联运行的条件

发电机并入到电网时, 要求在短时间内 (几个周波) 不产生电流的冲击, 因此并网时需满足下述条件:

- 发电机的频率等于电网频率
- 发电机的电压幅值等于电网电压的幅值
- 发电机的电压相序与电网的相序相同
- 在并网时, 发电机电压的相位与电网电压的相位一样

如果上述条件有一个不满足, 都会对发电机运行产生严重的后果: 在绕组中产生环流, 引起发电机功率振荡, 增加运行损耗, 运行不稳定等。



東南大學電氣工程學院

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

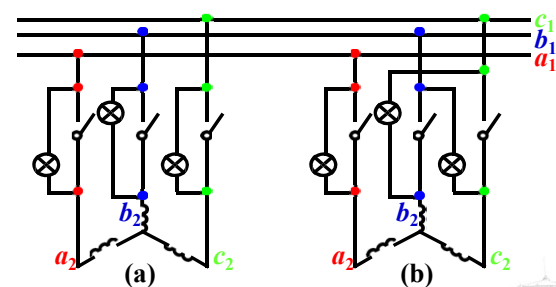
III 并联运行的方法

- 整步过程: 为了投入并联所进行的调节和操作过程。
- 实用的整步方法有两种:
 - 准确整步法: 把发电机调整到完全合乎并联的条件
 - 自整步法: 利用电磁场把转子自动牵入同步
- 整步前的准备:
 - 检查并联条件 通常用电压表测量电网电压 U_1 , 并调节发电机的励磁电流使得发电机的输出电压 $U=U_1$ 。
 - 确定合闸时刻 借助同步指示器检查并调整频率和相位以确定合闸时刻。



東南大學電氣工程學院

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

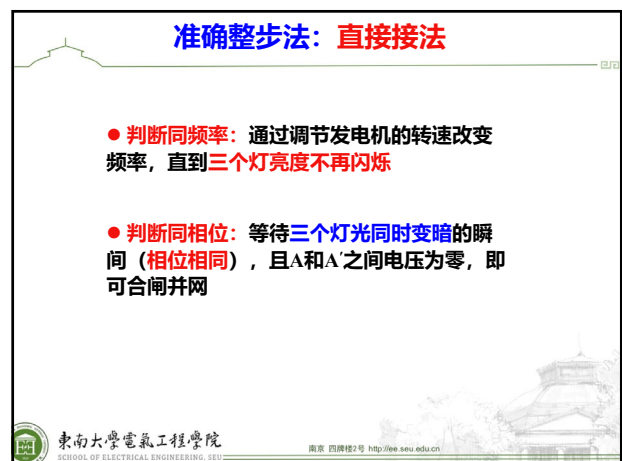
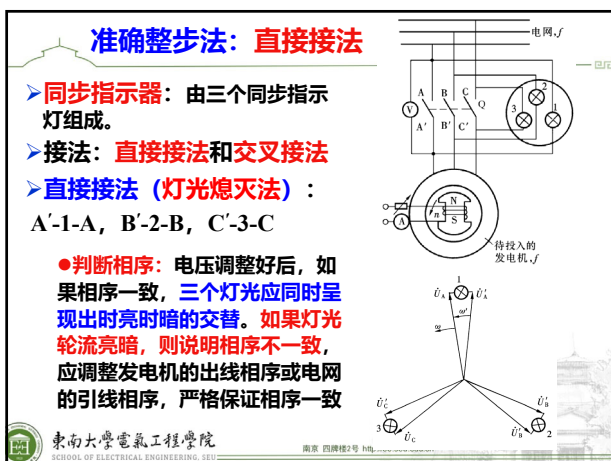
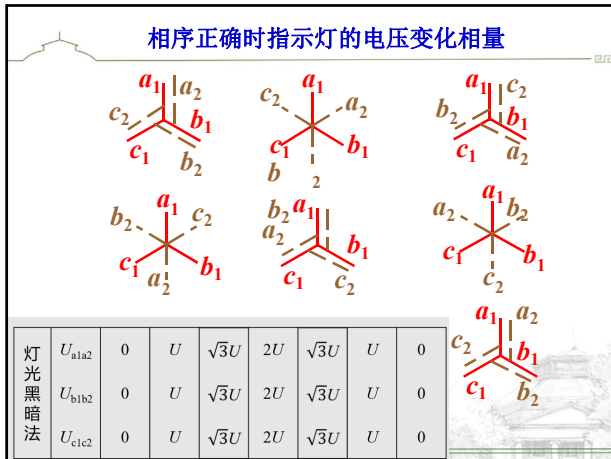


三相同步发电机的整步 (a)灯光黑暗法; (b)灯光旋转法



東南大學電氣工程學院

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>



准确整步法：交叉接法

➤ **交叉接法（灯光旋转法）：**
A'-1-A, C'-2-B, B'-3-C

电压大小调整后：

- 如果相序一致，则灯光旋转
- 如灯光同步则说明相序不一致，需停车调整相序。

东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

准确整步法：交叉接法

➤ **交叉接法（灯光旋转法）：**

- 若 f' 不等于 f ，可以根据三个灯旋转次序（方向），判断出发电机频率和电网频率的大小，使用较多
- $f' > f$, 1-2-3 灯光逆时针旋转
- $f' < f$, 3-2-1 灯光顺时针旋转
- 通过调节发电机的转速改变频率，直到灯光旋转十分缓慢时，说明频率十分接近，这时等待灯 1 完全熄灭的瞬间到来，即可合闸并网。

东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

• 灯光黑暗法

- 电压将不断的变化，它们的灯光便将忽亮忽暗的闪烁
- 当两边的频率愈为接近时，灯光的闪烁便愈为缓慢
- 灯光黑暗时合闸

东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

• 灯光旋转法

- 指示灯将依次明亮或黑暗，若把三组指示灯排列成圆形，就形成灯光旋转现象
- 发电机应在直接连接的一组指示灯黑暗时合闸

东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

自整步法

- 前提：相序一致
- 将励磁绕组通过电阻短接，约为励磁电阻的10倍
- 拖动到接近同步速(相差2~5%)，在无励磁电流的情况下，将发电机接入电网
- 再接通励磁并调节励磁，依靠定子磁场和转子磁场之间的电磁转矩将转子拉入同步转速，并网过程结束

需要注意的是：励磁绕组必须通过一限流电阻短接，因为直接开路，将在其中感应出危险的高压；直接短路，将在定、转子绕组间产生很大的冲击电流

- 优点：操作简单，方便快捷
- 缺点：合闸时有冲击电流
- 适用于事故状态下的紧急并联



東南大學電氣工程學院

南京 四牌樓2號 http://ee.seu.edu.cn

2. 隐极同步发电机的功角特性

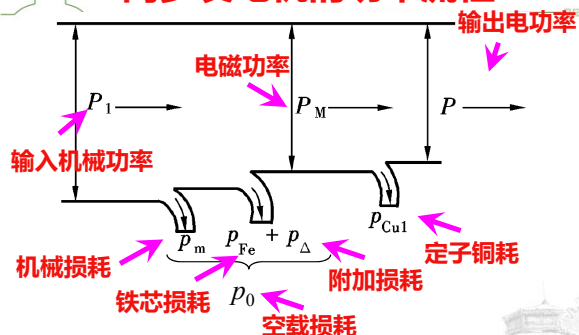
- 功率流程
- 功率表示式
- 功角特性
- 转矩特性



東南大學電氣工程學院

南京 四牌樓2號 http://ee.seu.edu.cn

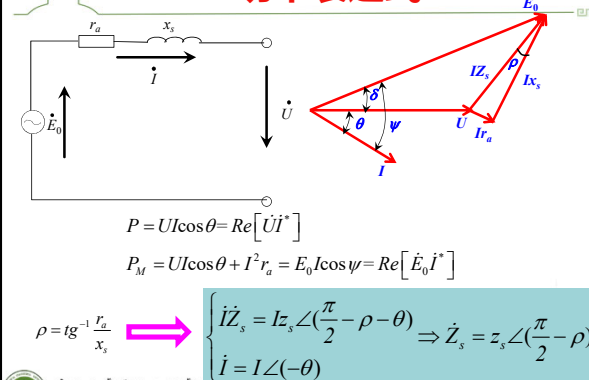
I 同步发电机的功率流程



東南大學電氣工

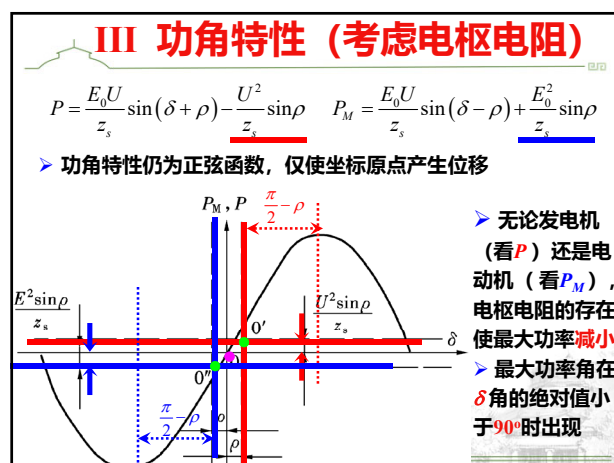
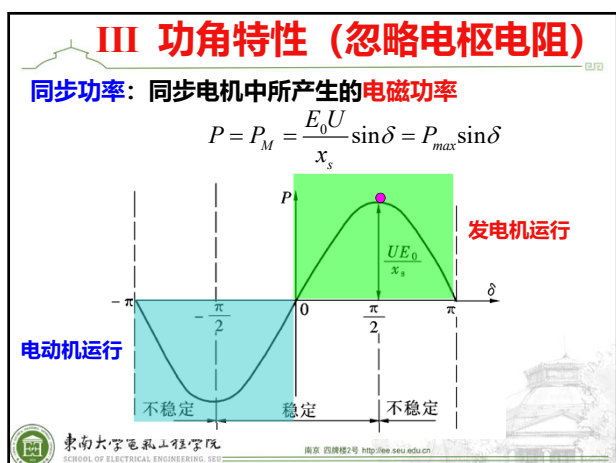
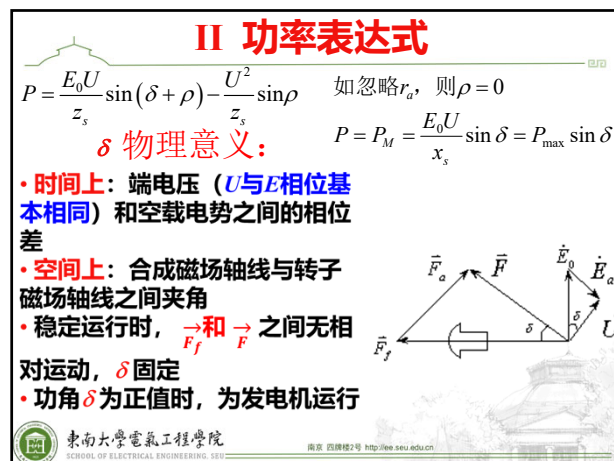
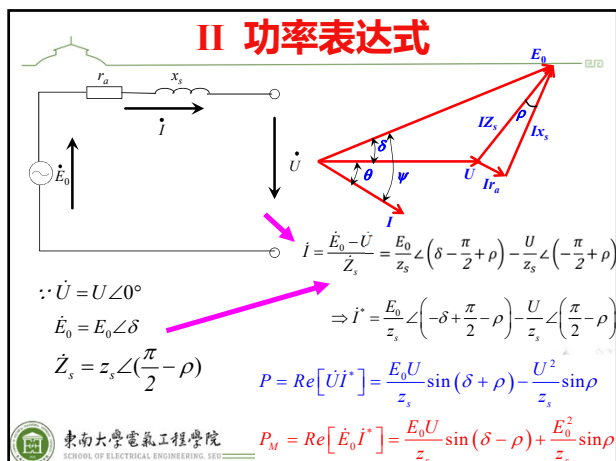
$$P_M - P = p_{cu1} = I^2 r_a$$

II 功率表达式



東南大學電氣工程學院

南京 四牌樓2號 http://ee.seu.edu.cn



III 功角特性 (考虑电枢电阻)

$$P = \frac{E_0 U}{z_s} \sin(\delta + \rho) - \frac{U^2}{z_s} \sin \rho \quad P_M = \frac{E_0 U}{z_s} \sin(\delta - \rho) + \frac{E_0^2}{z_s} \sin \rho$$

• 电枢电阻的影响

• 发电机

- 输出电功率即端点功率 P , 功角特性应取 0° 为原点

• 电动机

- 由电功率转变而来的机械功率即为电磁功率 P_M , 故功角特性应取 0° 为原点
- 无论发电机或电动机, 电枢电阻都将使最大功率的数值减小, 且使最大功率时 角的绝对值小于 90°



東南大學電氣工程學院

南京 四牌樓2號 http://ee.seu.edu.cn

IV 转矩特性

$$T = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{p}{\omega} P_M = \frac{p}{\omega} \times \frac{E_0 U}{z_s} \sin \delta$$

→ 转矩特性与功角特性形状相同

过载能力 k_M : 最大功率与额定功率之比

$$\delta = \delta_N \quad P_N = \frac{E_0 U}{x_s} \sin \delta_N \quad P_{max} = \frac{E_0 U}{x_s}$$

$$k_M = \frac{1}{\sin \delta_N}$$

在负载一定的情况下, 要减小

δ_N , 可减小 x_s , 即需有较大短路比 k_k , 则电机过载能力大

→ δ_N 越小, k_M 越大 → 但增大短路比, 将增加电机的成本, 故过载能力不应规定得过大。汽轮发电机的过载能力一般不小于 1.5, 则 $\delta_N \leq 41.8^\circ$

隐极同步发电机的功角特性

• 【例13-1】

• QFS-300-2型汽轮发电机

• $S_N=353\text{MVA}$, $I_N=11320\text{A}$, $U_N=18000\text{V}$, 双星形接法, $\cos \theta_N=0.85$ (滞后), $x_{s*}=2.26$ (不饱和值), 电枢电阻可忽略不计。

• 此发电机并联在无穷大汇流排进行, 当运行在额定情况时, 试求:

- (1) 不饱和的空载电势 E_0 ;
- (2) 功角 δ_N ;
- (3) 电磁功率 P_M ;
- (4) 过载能力 k_M



東南大學電氣工程學院

南京 四牌樓2號 http://ee.seu.edu.cn

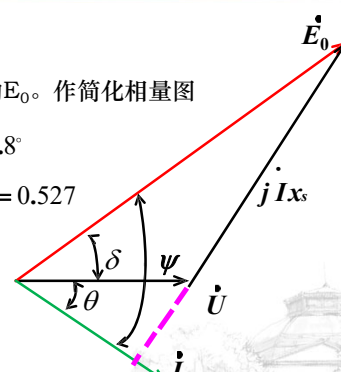
隐极同步发电机的功角特性

• 解:

- (1) 求不饱和的 E_0 。作简化相量图

$$\theta_N = \cos^{-1} 0.85 = 31.8^\circ$$

$$\sin \theta_N = \sqrt{1 - 0.85^2} = 0.527$$



東南大學電氣工程學院

南京 四牌樓2號 http://ee.seu.edu.cn

隐极同步发电机的功角特性

- 用标么值计算，因为 $U^* = 1.0$, $I^* = 1.0$

$$E_{0*} = \sqrt{(U_* \sin \theta_N + I_* x_{s*})^2 + U_*^2 \cos^2 \theta_N}$$

$$= \sqrt{(1 + 0.527 + 1 \times 2.26)^2 + (1 \times 0.85)^2}$$

$$= 2.92$$

$$E_0 = E_{0*} \frac{U_N}{\sqrt{3}} = 2.92 \times \frac{18000}{\sqrt{3}}$$

$$= 30345 (V) \quad (\text{每相值})$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

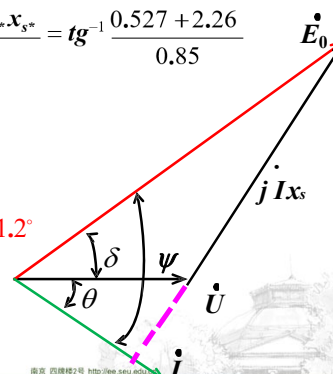
隐极同步发电机的功角特性

$$\psi_N = \tan^{-1} \frac{U_* \sin \theta_N + I_* x_{s*}}{U_* \cos \theta_N} = \tan^{-1} \frac{0.527 + 2.26}{0.85}$$

$$= \tan^{-1} 3.3 = 73^\circ$$

$$\therefore \delta_N = \psi_N - \theta_N$$

$$= 73^\circ - 31.8^\circ = 41.2^\circ$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

隐极同步发电机的功角特性

- (3) 求 P_M

$$P_* = \frac{U_* E_{0*}}{x_{s*}} \sin \delta_N = \frac{1 \times 2.92}{2.26} \sin 41.2^\circ = 0.85$$

- 三相总的电磁功率为

$$P_M = 0.85 \times 353 \times 10^6 = 300 \times 10^6 = 300 (MW)$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

隐极同步发电机的功角特性

- (4) 求过载能力 k_M

$$k_M = \frac{1}{\sin \delta_N} = \frac{1}{\sin 41.2^\circ} = \frac{1}{0.66} = 1.52$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

作业

- 思考题: p.288 13-1~13-2
- 习题: p.289 13-1 (写在作业本上)
- 要求: 绘出相量图, 说明参考相量。

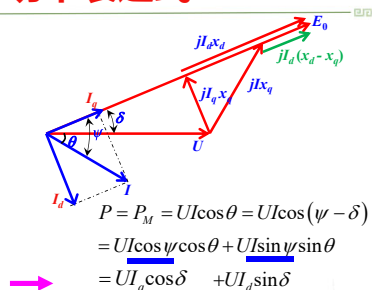
3. 凸极同步发电机的功角特性

- 功率表示式
- 功角特性

I 功率表达式

$$\begin{cases} I_q x_q = U \sin \delta \\ I_d x_d = E_0 - U \cos \delta \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_q = \frac{U \sin \delta}{x_q} \\ I_d = \frac{E_0 - U \cos \delta}{x_d} \end{cases}$$



$$P = P_M = UI \cos \theta = UI \cos (\psi - \delta)$$

$$= UI \cos \psi \cos \theta + UI \sin \psi \sin \theta$$

$$= UI_q \cos \delta + UI_d \sin \delta$$

$$P = P_M = \frac{E_0 U}{x_d} \sin \delta + \frac{U^2 (x_d - x_q)}{2 x_d x_q} \sin 2 \delta$$

II 功角特性

$$P = P_M = \frac{m E_0 U}{x_d} \sin \delta + \frac{m U^2 (x_d - x_q)}{2 x_d x_q} \sin 2 \delta$$

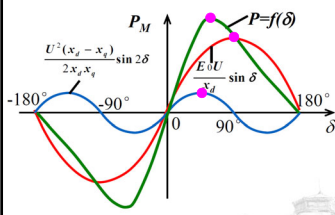
基本电磁功率 附加电磁功率

- **基本电磁功率**: 定子电枢电流与转子励磁磁场之间的相互作用而形成
 - **附加电磁功率**: 凸极电机直轴和交轴位置的磁阻不相等引起, 所以亦称为**磁阻功率**
- 注意**: 附加电磁功率与 E_0 无关, 只与电网电压 U 有关, 意味着即使 $E_0=0$ (转子无励磁), 只要 U 不为零, δ 不为零, x_d 和 x_q 不相等, 就会产生附加电磁功率

II 功角特性

$$P = \frac{mE_0 U}{X_d} \sin \delta + \frac{mU^2 (X_d - X_q)}{2X_d X_q} \sin 2\delta$$

- 基本电磁功率最大值：在 $\delta=90^\circ$ 时；
- 附加电磁功率最大值：在 $\delta=45^\circ$ 时；



凸极式同步电机的功角特性

- 合成电磁功率最大值出现在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间；
- 凸极式电机的电磁功率比具有同样 E_0 、 U 和 X_d 的隐极式电机略大；
- 正常情况下，附加电磁功率只占合成总功率的百分之几。

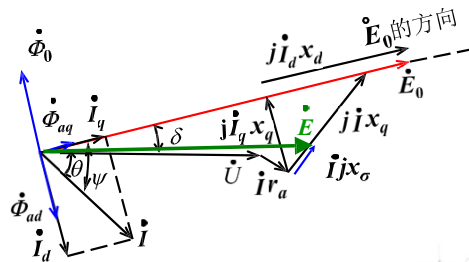
II 功角特性

因漏抗压降一般较小，端电压 U 和电枢合成电势 E 相差甚微，可近似认为 δ 为 E_0 和 E 之间的时间相角差，因此也就是转子磁场和空气隙合成磁场之间的空间位移角；

- 功角的数值决定着电机电磁功率的大小；
- 功角的正负决定着电机的运行方式；

- 当 $\delta > 0$ 时，转子磁场超前合成磁场，同步电机作为发电机运行
- 当 $\delta < 0$ 时，转子磁场滞后合成磁场，同步电机作为电动机运行

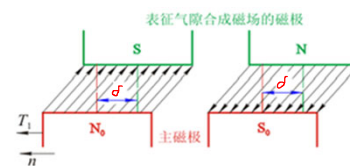
II 功角特性



凸极同步发电机的相量图



II 功角特性



II 功角特性

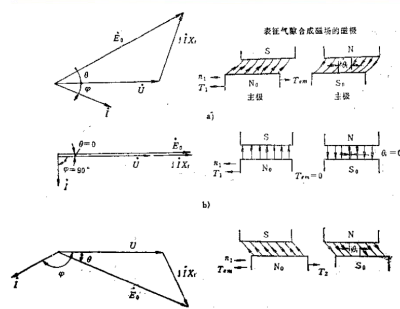


图26-1 同步发电机过渡及同步电动机的过程

a) 发电机 b) 过渡状态 c) 电动机



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

• 【例13-2】

- 一台三相凸极式水轮发电机
 - 50Hz、星形连接、11kV、8750kVA。当额定运行情况时的功率因数为0.8(滞后)，每相同步电抗 $x_d = 17\Omega$ ， $x_q = 9\Omega$ ，电阻可以略去不计。
- 试求：
 - (1) 同步电抗的标么值；
 - (2) 额定运行情况下的功率角 δ_N 及空载电势 E_0 ；
 - (3) 最大电磁功率 P_{max} 、过载能力 k_m 及产生最大功率时的功率角 δ 。



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

解：

- (1) 额定相电流和额定相电压

$$I_N = \frac{8750}{\sqrt{3} \times 11} = 460(A) \quad U_N = \frac{11000}{\sqrt{3}} = 6350(V)$$

- 同步电抗的标么值

$$x_{d*} = x_d / (U_N / I_N) = 17 \times \frac{460}{6350} = 1.232$$

$$x_{q*} = x_q / (U_N / I_N) = 9 \times \frac{460}{6350} = 0.654$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

- (2) 作相量图。令端电压为参考轴

$$\dot{U}_{N*} = 1.0 + j0 \quad \dot{I}_{N*} = 0.8 - j0.6$$

$$\dot{U}_{N*} + j \dot{I}_{N*} x_{q*} = 1.0 + j(0.8 - j0.6) \times 0.654 = 1.392 + j0.523$$

$$\delta_N = \tan^{-1} \frac{0.523}{1.392} = \tan^{-1} 0.376 = 20.7^\circ$$

$$\theta_N = \cos^{-1} 0.8 = 36.9^\circ$$

$$\psi = \delta_N + \theta_N = 20.7^\circ + 36.9^\circ = 57.6^\circ$$

$$I_{d*} = 1 \times \sin \psi = \sin 57.6^\circ = 0.845$$

$$I_{q*} = 1 \times \cos \psi = \cos 57.6^\circ = 0.536$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

- 所以空载电势标么值为

$$\begin{aligned} E_{0*} &= U_{N*} \cos \delta_N + I_{d*} x_{d*} \\ &= \cos 20.7^\circ + 0.845 \times 1.232 \\ &= 0.937 + 1.041 = 1.978 \end{aligned}$$

- 空载电势每相实际值为

$$E_0 = 1.978 \times 6350 = 12560 \text{ (V)}$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

- (3) 功角特性

$$\begin{aligned} P_{M*} &= \frac{E_{0*} U_*}{x_{d*}} \sin \delta + \frac{U_*^2 (x_{d*} - x_{q*})}{2 x_{d*} x_{q*}} \sin 2\delta \\ &= \frac{1.978}{1.232} \sin \delta + \frac{1^2 (1.232 - 0.654)}{2 \times 1.232 \times 0.654} \sin 2\delta \\ &= 1.605 \sin \delta + 0.359 \sin 2\delta \end{aligned}$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

- 令 $\frac{dP_{M*}}{d\delta} = 0$, 则有

$$\frac{dP_{M*}}{d\delta} = 1.605 \cos \delta + 0.718 \cos 2\delta = 0$$

- 故

$$1.605 \cos \delta + 0.718 (2 \cos^2 \delta - 1) = 0$$

$$1.436 \cos^2 \delta + 1.605 \cos \delta - 0.718 = 0$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

- 故

$$\begin{aligned} \cos \delta &= \frac{-1.605 \pm \sqrt{1.605^2 + 4 \times 1.436 \times 0.718}}{2 \times 1.436} \\ &= \frac{-1.605 \pm 2.59}{2.872} \end{aligned}$$

- 由于 $\cos \delta$ 必须小于1, 故应取正号, 即

$$\begin{aligned} \cos \delta &= \frac{0.985}{2.872} = 0.342, & \delta &= 70^\circ 2.872 \\ \sin \delta &= 0.94 & \sin 2\delta &= 0.643 \end{aligned}$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

• 故

$$P_{\text{Max}} = 1.605 \times 0.94 + 0.359 \times 0.643 \\ = 1.509 + 0.231 = 1.74$$

• 三相总的最大功率

$$P_{\text{max}} = 1.74 \times 8750 = 15225(\text{kW})$$

• 过载能力

$$k_M = \frac{P_{\text{max}}}{P_{N^*}} = \frac{1.74}{0.8} = 2.18$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

4. 同步发电机的有功功率调节

- 有功功率的调节
- 静态稳定的概念
- 动态稳定的概念



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

I 有功功率的调节

- **无穷大电网**：交流电网装有调压、调频装置，其频率和电压基本上不受负载变化或其他扰动的影响，可认为其恒频、恒压
- **并联运行的特点**：同步发电机并联到无穷大电网后，其频率和端电压将受到电网的约束而与电网相一致
- 输入机械功率 P_1 ，空载损耗 p_0 ，电磁功率 P_M ，输出电功率 P ，则功率平衡方程为：

$$P = P_M = P_1 - p_0$$

- **转矩平衡方程为**：

$$\text{电磁转矩} \rightarrow T_M = T_1 - T_0$$



東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

I 有功功率的调节

- 有功功率的调节时功角 δ 的变化
 - 并网前，空载时， $P_M = 0$ ， $\delta = 0$ ，转子磁场与定子磁场重合
 - 增加输入功率，输入转矩 T_1 增大，转子加速，转子磁场超前于定子磁场
 - 当功角达到某一 $\delta > 0$ ，电磁功率为

$$P_M = P_1 - p_0$$

电机加速过程结束。

- 转矩达到平衡： $T_1 = T_M + T_0$



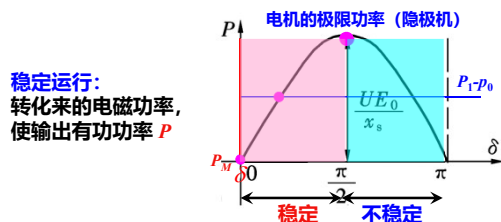
東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2號 <http://ee.seu.edu.cn>

I 有功功率的调节

绘图

I 有功功率的调节



要调节发电机的输出有功功率, 只需要调节发电机的
输入机械功率。
发电机内部自动改变位移角 δ , 相应改变电磁功率和
输出功率, 达到新的功率平衡。

I 有功功率的调节

• 稳定范围

• 同步发电机

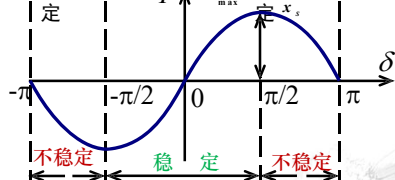
同步电动机

• $0 < \delta < \pi/2$: 稳定

• $-\pi/2 < \delta < 0$: 稳定

• $\pi/2 < \delta < \pi$: 不稳定

• $-\pi < \delta < -\pi/2$: 不稳定



II 静态稳定的概念

扰动: 发电机输入功率的微小变化, 发生瞬时的增大或者减小

静态稳定: 发电机能在瞬时扰动消除后, 继续保持原来的平衡运行状态

II 静态稳定的概念

a 点: $\Delta P_1 > 0$, 转子加速, $\delta_a + \Delta\delta = \delta_b$, ΔP_M $\Delta P_1 < 0$ 时, 情况如何?

扰动消失后, $P_1 < P_{M0} + P_0$, 转子减速
 $\delta_b - \Delta\delta = \delta_a$, 达到原有的功率平衡

对 d 点, 情况又如何?

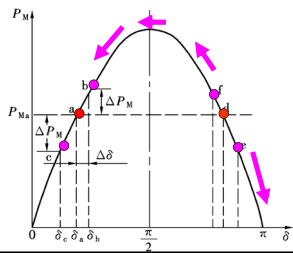
$\Delta P_1 > 0$? $\Delta P_1 < 0$?

a 点静态稳定

d 点静态不稳定

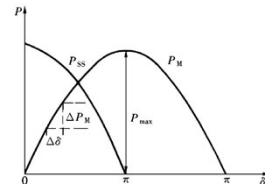
结论: 处于功角特性的曲线上升部分的工作点, 是静态稳定的, 即

$$\frac{dP_M}{d\delta} > 0$$



II 静态稳定的概念

隐极式电机比整步功率: $P_{ss} = \frac{dP_M}{d\delta} = \frac{E_0 U}{x_s} \cos \delta$



P_{ss} 可表示发电机的稳定度:

➤ 空载时, $\delta=0$, P_{ss} 最大, 最稳定

➤ $\delta=\pi/2$, $P_{ss}=0$, 将进入不稳定状态

➤ $\delta>\pi/2$, $P_{ss}<0$, 失去稳定

$$\text{隐极机: } P_{ss} = \frac{E_0 U}{x_s} \cos \delta$$

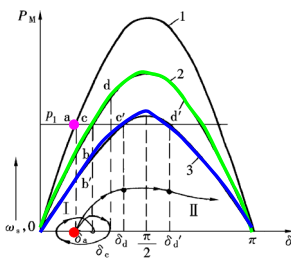
$$\text{凸极机: } P_{ss} = \frac{E_0 U}{x_d} \cos \delta + U^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta$$

東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 http://ee.seu.edu.cn

III 动态稳定的概念

扰动: 负载突然变化 (加载、卸载、短路、失磁、电压突变), U 发生剧烈变化



a 点: 原正常运行点

$$P_0=0, P_1=P_{Ma}$$

曲线2: 电网电压因事故明显降低

$$P_1 > P_{Mb} \quad P_1 = P_{Mc}$$

曲线3: 电压降低很大

$$P_1 \gg P_{Mb}$$

東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 http://ee.seu.edu.cn

分析: 比较下列情况电机的稳定性

➤ 短路比大小:

短路比大, 则同步电抗小, P_{max} 大, 一定 P 时, δ 角较小, 稳定性好。

➤ 有功一定时, 过励与欠励:

过励时 E_0 大, δ 角小, 稳定性好。

➤ 励磁相同时, 轻载与满载:

P_{max} 相同, 轻载时 δ 角小, 稳定性好。

➤ 直接接电网或通过电抗接电网:

直接接电网稳定性好。因为通过外电抗接电网, 则 P_{max} 由电抗分配, 较直接接电网时小, 一定 P 时, δ 角较大, 稳定性差。

東南大學電氣工程學院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌樓2号 http://ee.seu.edu.cn

5. 无功功率的调节和V形曲线

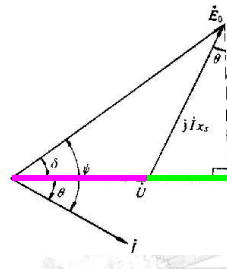
不计电枢电阻时隐极电机的无功功率

$$E_0 \cos \delta = U + I x_s \sin \theta$$

$$I \sin \theta = \frac{E_0 \cos \delta - U}{x_s}$$

$$Q = UI \sin \theta$$

$$Q = \frac{E_0 U}{x_s} \cos \delta - \frac{U^2}{x_s}$$

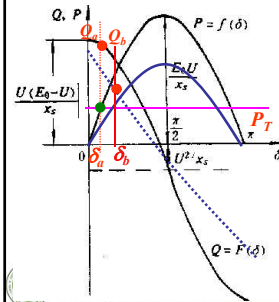


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

5. 无功功率的调节和V形曲线

$$Q = \frac{E_0 U}{x_s} \cos \delta - \frac{U^2}{x_s}$$



设功率为 P_T , 运行于 a 点, 功角 δ_a , 无功为 Q_a

假设原动机输入功率不变, 减小励磁电流, 则 E_0 减小

功角特性幅值降低, 运行点变为 b 点, 功角为 δ_b , 相应无功变为 Q_b , 即减小了无功输出

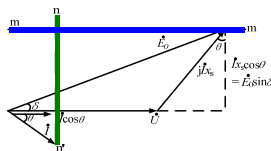
静态稳定度降低

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

5. 无功功率的调节和V形曲线

当发电机有功功率 P 不变时, 由于 P 和 P_M 近似相等, 则:

$$\begin{cases} P = UI \cos \theta = \text{const} \\ P_M = \frac{E_0 U}{x_s} \sin \delta = \text{const} \end{cases} \xrightarrow[U=\text{const}]{x_s=\text{const}} \begin{cases} I \cos \theta = \text{const} \\ E_0 \sin \delta = \text{const} \end{cases}$$

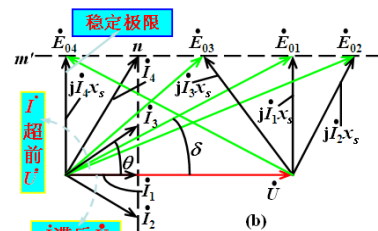


东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

5. 无功功率的调节和V形曲线

当调节励磁时, E_0 发生变化, 使定子电流 I 和功率因数同时变化



$P_M = \text{const}$ 时, 调节励磁电流的相量图



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

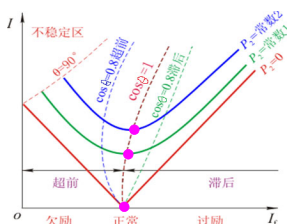
南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

5. 无功功率的调节和V形曲线

V形曲线：有功功率保持不变时，电枢电流 I 和励磁电流 I_f 之间关系的曲线 $P=\text{const}$, $I=f(I_f)$

➤ 对应于不同的有功功率，有不同的V形曲线。当输出功率愈大时，曲线愈向上移
➤ 对于每一给定的有功功率都有一允许的**最少励磁**，进一步**减小励磁**将使发电机失去稳定。

➤ 不改变输入机械功率，仅调节**励磁**，只会改变**无功**，并不会改变**有功**。



东南大学电气工程学院

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

5. 无功功率的调节和V形曲线

结论：无功功率调节特性

- 当发电机与无穷大电网并联时，调节**励磁电流**的大小，就可以改变发电机输出的**无功功率**，不仅能改变无功功率的**大小**，而且能改变无功功率的**性质**。
- 当**过励**时，电枢电流是**滞后**电流，发电机输出**感性**无功功率。
- 当**欠励**时，电枢电流是**超前**电流，发电机输出**容性**无功功率。



东南大学电气工程学院

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

5. 无功功率的调节和V形曲线

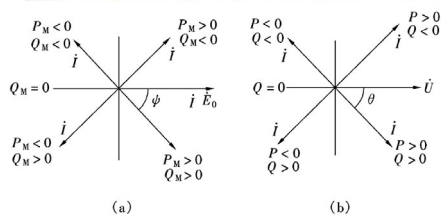


图 12-56 同步电机的各种运行情况
(a) 以电磁功率为准；(b) 以外功率为准

如图 (b) 所示，以外功率作为研究对象，以 U 与 I 的夹角定义**过励与欠励**，与图 (a) 不同。
增磁去磁其实只能从**内功率因数角**来判断。（用图 (a)）



东南大学电气工程学院

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

例题分析 (p.277 13-3)

一台汽轮发电机在额定运行情况下的功率因数为**0.8 (滞后)**，同步电抗为 $x_s^* = 1.0$ 。该机并联在电压保持额定值的无穷大汇流排上。

(1) 试求当该机供给90%额定电流时且有额定功率因数时，输出的有功功率和无功功率。这时的空载电动势 E_0 和功角 δ 为多少？

(2) 如调节原动机的输入功率，使该机输出的有功功率达到额定运行情况的110%，励磁保持不变，这时的 δ 角为多少度？该机输出的无功功率将如何变化？如欲使输出的无功功率保持不变，试求空载电动势 E_0 及位移角 δ 的数值。

(3) 如保持原动机方面的输入功率不变，并调节该机的励磁，使它输出的感性无功功率为额定运行情况下的110%，试求此时的空载电动势 E_0 和功角 δ 的数值。



东南大学电气工程学院

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

分析:

1. 并联在无穷大电网上, 不论输入机械功率、励磁电流和负载如何变化, 则输出电压保持为额定电压;

$$\dot{U}_* = 1 \angle 0^\circ = 1 + j0$$

2. 计算空载电动势 $\dot{E}_{0*} = \dot{U}_* + j\dot{I}_*x_{s*}$

需先知道输出电流的相量 $\dot{I}_* = I_* \angle \theta = I_{a*} + jI_{r*}$

解: (1) 90%额定电流, 且有额定功率因数, 则

$$I_* = 0.9 \quad \cos \theta = 0.8 (\text{滞后})$$

$$\dot{I}_* = I_* \angle \theta = 0.9 * (0.8 - j0.6) = 0.72 - j0.54$$

输出有功功率为0.72, 无功功率为0.54

空载电动势 $\dot{E}_{0*} = 1 + j(0.72 - j0.54) * 1 = 1.54 + j0.72 = 1.70 \angle 25.1^\circ$



東南大學電氣工程學院

南京 四牌樓2號 http://ee.seu.edu.cn

(2) 如调节原动机的输入功率, 使该机输出的有功功率达到额定运行情况的110%, 励磁保持不变, 这时的 δ 角为多少度? 该机输出的无功功率将如何变化? 如欲使输出的无功功率保持不变, 试求空载电动势 E_0 及位移角 δ 的数值。

解: 有功为额定的110%, 则 $P_* = 0.8 * 1.1 = 0.88$

励磁保持不变, 则空载电动势 $E_0 = 1.70$ (大小不变)

$$\text{由功角特性 } P = \frac{E_{0*} U_*}{x_{s*}} \sin \delta, \text{ 计算出 } \delta = 31.2^\circ$$

励磁不变, 有功增加, 则 δ 增加, 无功减少

根据电压方程式, 反过来计算输出电流

$$j\dot{I}_*x_{s*} = \dot{E}_{0*} - \dot{U}_* = 1.70(\cos 31.2^\circ + j\sin 31.2^\circ) - 1 = 0.454 + j0.88$$

$$-\dot{I}_* = j0.454 - 0.88 \quad \dot{I}_* = 0.88 - j0.454$$

(2) 如欲使输出的无功功率保持不变, 试求空载电动势 E_0 及位移角 δ 的数值。

$$\dot{I}_* = 0.88 - j0.54$$

$$\dot{E}_{0*} = 1 + j(0.88 - j0.54) * 1 = 1.54 + j0.88 = 1.77 \angle 29.8^\circ$$

(3) 如保持原动机方面的输入功率不变, 并调节该机的励磁, 使它输出的感性无功功率为额定运行情况下的110%, 试求此时的空载电动势 E_0 和功角 δ 的数值。

解: 保持有功不变, 即 $I_{a*} = 0.72$ 。

无功为额定的110%, 则 $I_{r*} = 0.6 * 1.1 = 0.66$

根据电压方程式计算空载电动势

$$\dot{E}_{0*} = \dot{U}_* + j\dot{I}_*x_{s*} = 1 + j(0.72 - j0.66) * 1 = 1.66 + j0.72 = 1.81 \angle 23.5^\circ$$

空载电动势的有效值增加到1.81, 功角 δ 减小到23.5°。

思考题

►发电机的定子电流的功率因数的确定

1. 单独给对称负载供电时, 由负载阻抗决定;

2. 与大电网并联时, 负载由电网供给。

发电机担负的有功功率由其原动机的功率大小决定;

发电机担负的无功功率决定于发电机的励磁电流, 过励时功率因数滞后, 欠励时功率因数超前。



東南大學電氣工程學院

SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

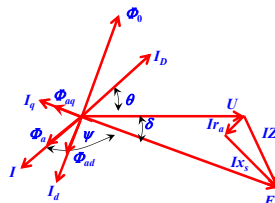
南京 四牌樓2號 http://ee.seu.edu.cn

6. 同步电动机与同步补偿机

- 同步电动机运行分析
- 同步电动机的起动
- 同步补偿机

I 同步电动机运行分析

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} [r_a + j(x_a + x_\sigma)] = \dot{U} + \dot{I} (r_a + jx_s) = \dot{U} + \dot{I} Z_s$$

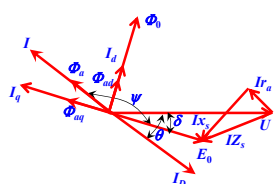


$$\frac{\pi}{2} < \psi < \pi$$

电动机处于
过励状态

I 同步电动机运行分析

$$\dot{E}_0 = \dot{U} + \dot{I} [r_a + j(x_a + x_\sigma)] = \dot{U} + \dot{I} (r_a + jx_s) = \dot{U} + \dot{I} Z_s$$



$$-\frac{\pi}{2} > \psi > -\pi$$

电动机处于
欠励状态

I 同步电动机运行分析

- 判断电动还是发电运行，只需要看 I_q 和 E_0 的相位关系：

- I_q 和 E_0 同方向，发电运行；
- I_q 和 E_0 反方向，电动运行；

- 判断过励还是欠励运行，只需要看 I_d 和 ϕ_0 的相位关系：

- I_d 和 ϕ_0 同方向，欠励运行；
- I_d 和 ϕ_0 反方向，过励运行；

- 调节同步电动机的励磁，可以改变它的输入电流的功率因数，而异步电动机的功率因数总是滞后的

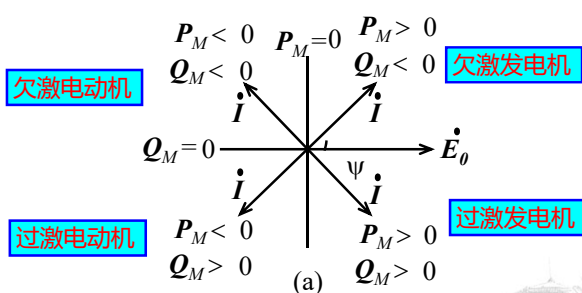
II 同步电动机的起动

- 同步电机在定子直接投入电网，转子加上直流励磁的条件下，无法自行起动，必须借助其他方法
- 异步起动法
在同步电机转子上装阻尼绕组获得起动转矩
- 辅助电动机起动法
- 变频起动法

III 同步补偿机

- 定义：根据调节励磁即可调节同步电动机的无功电流和功率因数这一特点，专门设计的用以改善电网功率因数、不带任何机械负载的同步电机，亦称为同步调相机。
- 本质：空载运行的电动机，不吸收有功功率，过励时，对电网供给感性无功功率。
- 运行状况：电磁功率接近零，零功率因数
- 特殊应用：在电网基本空载，由于长输电线电容影响，使受电端电压偏高时，可将同步补偿机在欠励下运行，以保持电网电压的稳定。

同步电机不同运行状态

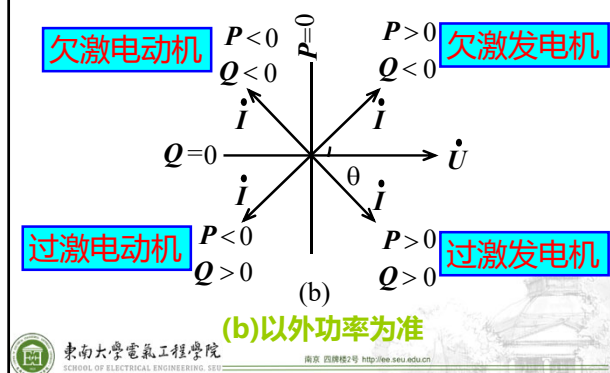


- 当发出的电磁功率仅为有功功率
 - 内功率因数为1 $\rightarrow (\psi = 0)$
 - 电枢反应仅有交轴分量

$$P_M = E_0 I \cos \psi$$

- 当发出的电磁功率仅为无功功率
 - 内功率因数为零 $Q_M = E_0 I \sin \psi$
 - 电枢反应仅有直轴分量

同步电机不同运行状态



$$P_M - P = p_{Cu1} = I^2 r_a$$

- 对于隐极式电机 $Q_M - Q = I^2 X_s$
- 对于凸极式电机 $Q_M - Q = I_d^2 x_d + I_q^2 x_q$

- 对两种电机都有

$$Q = UI \sin \theta$$

$$Q_M = E_0 I \sin \psi$$

作业

- 习题: p.289 13-2~13-4、13-6
- 要求: 绘出相量图, 说明参考相量, 熟练掌握凸极电机相量图的作法, 尽量用标幺值进行分析计算